



DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(2)-7
EDN LFMQOJ

УДК 534.23

© В. Н. Драченко¹, Г. Н. Кузнецов^{1*}, А. Н. Михнюк², 2025

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

²Российский университет дружбы народов, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

*skbmortex@mail.ru

Оценка координат широкополосного источника звука в океане комбинированным методом с использованием углов скольжения и интерференционной структуры на апертуре антенны

Статья поступила в редакцию 15.08.2024, после доработки 26.05.2025, принята в печать 17.06.2025

Аннотация

Для оценки дальности и глубины шумящих источников рекомендуется применять вертикальные антенны и алгоритмы обработки, учитывающие свойства волновода. Ниже установлено, что вертикальная антенна даже с небольшой апертурой может оценивать дальность и глубину источника в глубоком море на достаточно большом интервале расстояний и в случае, когда полная информация о модели сигнала не используется, но обрабатывается информация одновременно с применением двух дополняющих друг друга алгоритмов, учитывающих в вертикальной плоскости углы прихода лучевых сигналов и интерференцию звукового давления на апертуре антенны. Показано, что в зимних условиях оценка дальности и глубины источника может производиться и в зоне тени, а летом — преимущественно в ближней зоне акустической освещенности.

Ключевые слова: вертикальная антенна, передаточная функция волновода, оценка дальности и глубины источника, комбинированная обработка, использующая частично согласованные со средой алгоритмы

© V. N. Drachenko¹, G. N. Kuznetsov^{1*}, A. N. Mikhnyuk², 2025

¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 38 Vavilova Str., Moscow, 119991, Russia

²Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russia

*skbmortex@mail.ru

Estimation of Coordinates of a Broadband Sound Source in the Ocean by a Combined Method Using Grazing Angles and Interference Structure at the Antenna Aperture

Received 15.08.2024, Revised 26.05.2025, Accepted 17.06.2025

Abstract

To estimate the range and depth of noisy sources, it is recommended to use vertical antennas and processing algorithms that take into account the properties of the waveguide. Below, it is shown that a vertical antenna can estimate the range and depth of a

Ссылка для цитирования: Драченко В.Н., Кузнецов Г.Н., Михнюк А.Н. Оценка координат широкополосного источника звука в океане комбинированным методом с использованием углов скольжения и интерференционной структуры на апертуре антенны // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2025. Т. 18, № 2. С. 96–110.
[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-7) EDN: LFMQOJ

For citation: Drachenko V.N., Kuznetsov G.N., Mikhnyuk A.N. Estimation of Coordinates of a Broadband Sound Source in the Ocean by a Combined Method Using Grazing Angles and Interference Structure at the Antenna Aperture. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(2):96–110. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-7)

source in the deep sea over a sufficiently large range of distances and in the case when full information about the signal model is not used, but the information is processed simultaneously using two complementary algorithms that take into account the angles of arrival of beam signals in the vertical plane and the interference of sound pressure at the antenna aperture.

Keywords: vertical antenna, waveguide transfer function, source range and depth estimation, combined processing using partially environment-matched algorithms

1. Введение

При априорной определенности условий распространения и моделей сигнала и помех оценка координат подводных шумоподобных источников производится наиболее эффективно при учете передаточной функции волновода (ПФВ) [1–7]. При этом можно учесть как характеристики сигналов в источнике, так и их трансформацию при распространении в волноводе — в том числе при перемещении источника за время наблюдения. Но при таком подходе возникают большие затруднения в связи с необходимостью учета свойств ПФВ, зависящей от характеристик грунта, вертикального профиля скорости звука (ВРСЗ) и профиля глубин моря вдоль трассы распространения. Такая информация, как правило, известна в ограниченном объеме или отсутствует [1, 2, 7, 8]. Задача существенно усложняется, если необходимо учитывать движение источника или приемной системы и выполнять перебор вероятных координат по направлениям и скоростям относительного движения. В такой ситуации из-за неопределенности траектории движения «акустическая калибровка» [8] волновода, на основе которой производится идентификация модели ПФВ, оказывается недостаточной.

Задача становится еще более сложной, а, может быть, не решаемой, если нужно учитывать динамическую изменчивость свойств среды во времени и по пространству, хотя известны примеры, когда для учета изменчивости среды ставится и на определенном уровне решается задача оперативной океанографии [9, 10].

В этих условиях становится актуальной задача поиска решений, с одной стороны, учитывающих основные свойства ПФВ, а с другой — менее чувствительных к неточности используемой при обработке информации о волноводе, моделях сигнала и помех [11]. Такие алгоритмы в настоящее время изучаются и нашли применение. Среди них можно выделить алгоритмы, учитывающие угловую структуру сигналов и спектры временных задержек между принятыми сигналами, пришедшими по разным лучам.

В работе [12] исследуется возможность и эффективность учета указанных свойств сигналов при размещении вертикальных антенн на объемном носителе. В [13] получены и в общем виде изучены аналитические соотношения для расчета потенциальной точности определения положения источника в морском волноводе. В [14] разработаны и испытаны технические средства и алгоритмы для оценки дальности и глубины источников стационарными глубоководными системами подводного наблюдения с вертикальными антеннами. При этом используются крутые лучи, обладающие повышенной «устойчивостью» [15] к сезонным изменениям распределения скорости звука.

В [16, 17] также применительно к стационарным глубоководным гидроакустическим средствам предложены и исследуются методы оценки дальности и глубины движущегося источника, использующие кепстральную обработку совместно с анализом соотношения интервалов времени, в течение которых источник будет пересекать «рюмочные» характеристики направленности, образованные вертикальной придонной антенной.

В ряде работ изучаются особенности решения поставленной задачи в условиях подводного звукового канала [18, 19], при этом для повышения помехоустойчивости используется оригинальная «консолидированная» обработка сигнала на апертуре вертикальной антенны. Как следствие, удается синфазно «собрать» сигналы и создавать «кумулятивный эффект». В результате увеличивается мощность принимаемого сигнала и повышается пространственная избирательность по расстоянию и глубине источника.

Представляют также определенный интерес рекомендуемые для глубокого океана [20, 21] методы оценки дальности и глубины источника с использованием амплитудно-фазовой структуры вытекающих и захваченных мод, формирующих пары (группы) сигналов, отраженных от свободной поверхности и от поверхности и дна. В частности, установлено, что даже упрощенные алгоритмы имеют существенные ограничения на применение в связи с нестабильностью свойств среды или недостаточной разрешающей способностью приемных антенн. Например, показано, что при работе на границе ближней зоны акустической освещенности принятые лучи «слипаются» и для их «разрешения» необходимы антенны с большой апертурой. Но, как известно [22], антенны больших волновых размеров на течении могут отклоняться от вертикальной ориентации, деформируются и теряют разрешающую способность. Как следствие, применение таких антенн может оказаться не эффективным, если не выполнять специального позиционирования каждого ги-

дрофона [23]. Кроме того, на больших вертикальных апертурах для согласованной с ПФВ обработки следует учитывать зависимость от глубины приема структуры конгруэнции лучей в вертикальной плоскости [24]. В [25] этот вопрос детально изучается с точки зрения влияния размеров вертикальной антенны на эффективность пространственной локализации широкополосного источника. Даются полезные практические рекомендации.

Обстоятельный современный анализ различных алгоритмов и их обобщение применительно к горизонтальным и вертикальным антеннам содержится в [26].

Отметим, что в ряде случаев для оценки одновременно дальности и глубины анализа только угловых спектров или временных задержек недостаточно. В этих условиях рекомендуется использовать совместно нескольких дополняющих друг друга алгоритмов. Ниже рассматриваются два таких алгоритма, и путем компьютерного моделирования демонстрируется эффективность отдельного и совместного их применения с использованием сравнительно коротких вертикальных антенн.

2. Оценка углов прихода сигналов на апертуру антенны

Структуру звукового поля в глубоком море удобно исследовать с использованием лучевой модели или модового ВКБ-приближения. В рамках лучевой модели поле источника на апертуре приемной антенны представляется суммой лучей — квази-плоских волн, каждая из которых характеризуется своим углом прихода и своим временем распространения от источника до приемника. Рассмотрим эту модель подробнее.

Пусть $\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R$ — координаты точек излучения и приема. Тогда модель прямого звукового поля от ненаправленного единичного источника на приемнике будет иметь вид:

$$p_S(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R; \omega) = \sqrt{\frac{W \rho c}{4\pi}} S(\omega) \sum_{i=1}^{M(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)} A_i(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R) e^{i\omega t_{\mu}(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)}, \quad (1)$$

где W — мощность излученного сигнала, ρc — волновое сопротивление (импеданс) среды; $M(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)$ — число лучей, соединяющих точки излучения и приема, $A_{\mu}(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)$ — амплитуда поля единичного источника, прошедшего по μ -му лучу, $\mu = \overline{1, M(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)}$; $t_{\mu}(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)$ — время распространения сигнала по μ -му лучу.

Искомым и, соответственно, требующим оценки, является вектор координат источника \vec{r}_S . Будем считать, что параметры вектора поля $\vec{\Psi}$ известны частично: глубины волновода и приемной антенны, ВРСЗ, параметры антенны, диапазон рабочих частот, а также грубая оценка параметров грунта. Будем считать, что спектр шумов моря и их корреляционную матрицу $P(\omega)$ и $Q_P(\omega)$ можно оценить на апертуре АР до появления источника в зоне обзора. Это позволит повысить разрешение по углу за счет учета свойств угловой структуры поля помех. Прием сигналов будем выполнять вертикальной скалярной антенной в ближней зоне акустической освещенности (БЗАО) и примыкающем к ней участке зоны тени (ЗТ). С ее помощью в БЗАО можно определить углы скольжения (прихода) «прямого» луча θ_1 и лучей, отраженных от свободной поверхности моря или от дна θ_2 . Для этого на выбранных частотах сигналов сформируем в вертикальной плоскости отклик антенны как функцию углов компенсации:

$$U(\alpha, r) = \sum_{n=1}^N A_n(r) e^{i[\varphi_n(r) - (2\pi f / \bar{c}_0)(n-1)\Delta z \sin \alpha]}, \quad (2)$$

где N — количество приемников в антенне, Δz — интервал между ними, \bar{c}_0 — скорость звука в воде, $A_n(r)$ и $\varphi_n(r)$ — амплитуда и фаза сигнала на выходе n -го приемника, α — угол компенсации.

3. Оценка расстояния до источника и его глубины с использованием интерференционной структуры поля на апертуре антенны

Оценку дистанции до шумящего объекта и его глубины можно выполнить, используя один из возможных вариантов согласованной с акустическим полем обработки (matched-field-processing). Такая обработка является обобщением корреляционной обработки и учитывает сложную интерференционную структуру сигнального поля, создаваемого источником в морском волноводе на апертуре приёмной антенны. В этом случае вместо одной сигнальной волны, принимаемой от источника в свободном пространстве, необходимо учитывать набор пространственных гармоник (нормальных волн или лучей). Пространственные гармоники взаимодействуют друг с другом, что приводит к образованию интерференционной картины (ИК), вид которой зависит от частоты сигнала и координат приемников и источника в морском волноводе.

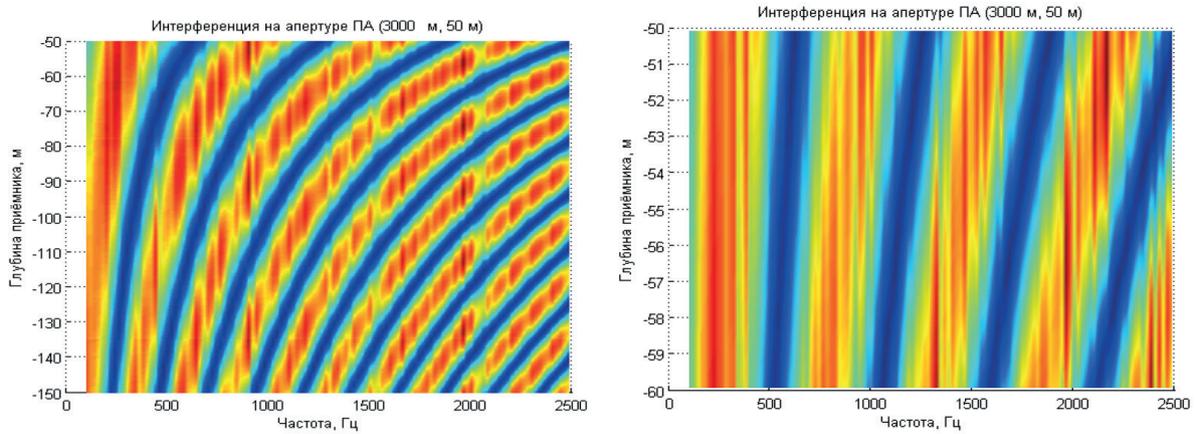


Рис. 1. Интерференционная структура звукового давления на апертуре вертикальной приемной антенны размером 100 м (слева) и 10 м (справа)

Fig. 1. Interference structure of sound pressure on the aperture of a vertical receiving antenna with a height of 100 m (left) and 10 m (right)

На рис. 1 приведены примеры интерференционной структуры поля на апертуре вертикальных антенн с апертурой 100 и 10 м. Расчеты выполнены в условиях глубокого моря (Норвежское море, глубина 3500 м (69.3315°с.ш., 4°з.д.), февраль (рис. 2, б). Источник сигнала находился на глубине 50 м при дистанции 3 км. Глубины расположения приемников указаны на вертикальной оси рисунков. Из рис. 1 следует, что интерференция в глубоком море из-за малого количества энерго-несущих лучей, оказывающих влияние на формирование ИК, имеет крупномасштабную структуру и формируется на апертуре как протяженных (рис. 1, а), так и коротких антенн (рис. 1, б). Сравним возможность использования характеристик интерференции на примере Норвежского моря в летних и зимних условиях.

Вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ) для августа показано на рис. 2, а, для февраля — на рис. 2, б. Параметры грунта, принятые при расчетах: скорость звука 1600 м/с, плотность — 1,6 г/см³, потери в грунте — 0,25 дБ/λ₁.

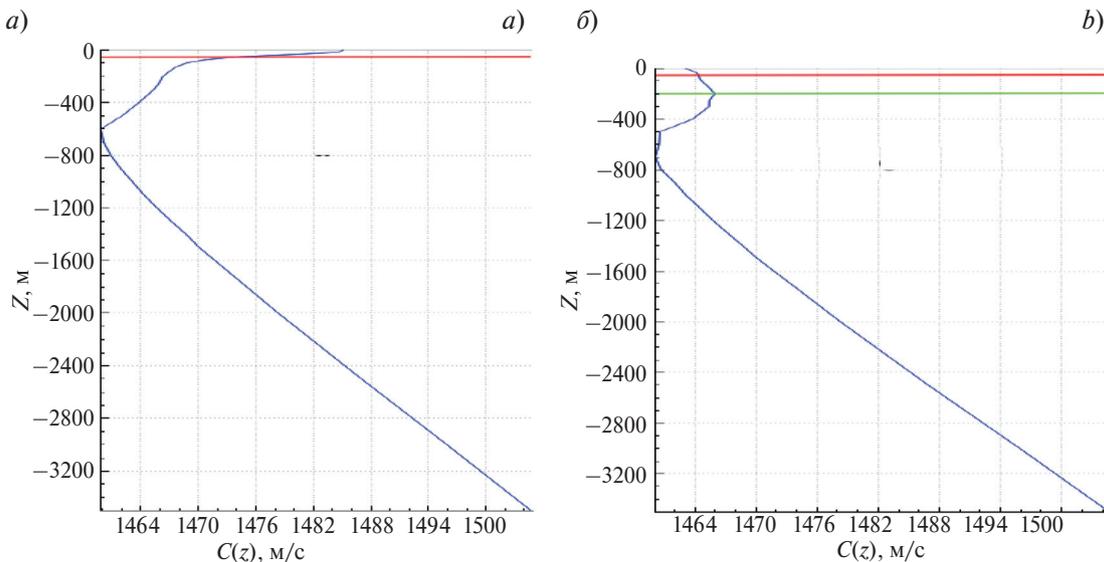


Рис. 2. Вертикальные распределения скорости звука в летний и зимний периоды

Fig. 2. Sound speed profiles in summer and winter periods

Спадание поля с увеличением r рассчитано по программе, использующей модовое ВКБ приближение [27, 28], (рис. 3, а — для лета, рис. 3, б — для зимы). Частота звука соответствует интервалу между приемниками $\lambda/2$ для вертикальной антенны и равна $f = c/\lambda = 1475/0,625 = 2360$ Гц. На рис. 3 обозначено:

(1) — зависимость уровня амплитуды звукового давления (дБ) от расстояния до источника в летних (а) или зимних (б) условиях, (2) — цилиндрическое спадание уровня сигнала при $f = 2360$ Гц, $z_s = 50$ м, $z = 55$ м. Видно, что и в летних, и в зимних условиях в ближней зоне акустической освещенности (БЗАО) наблюдается зона Ллойдовской интерференции [15], связанная с взаимодействием прямого и отраженного от свободной поверхности лучей. После БЗАО формируется зона тени (ЗТ), в которой в летних условиях водные, вытекающие и захваченные моды имеют малые амплитуды и оценка координат источника в ЗТ маловероятны [27, 28].

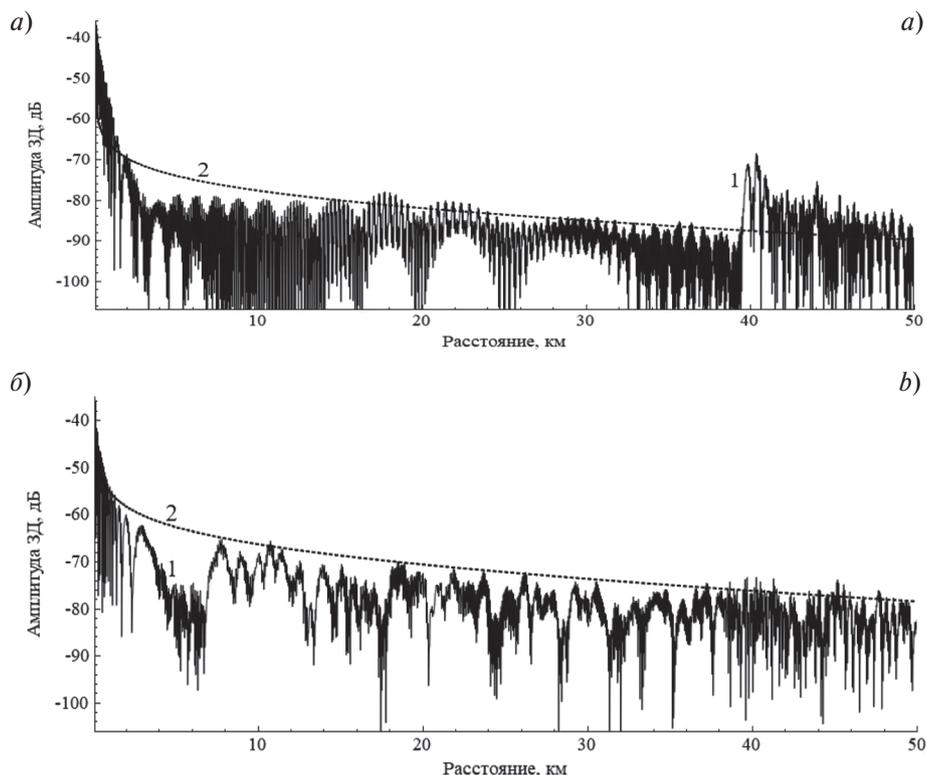


Рис. 3. Зависимости звукового давления от расстояния до источника летом и зимой

Fig. 3. Sound pressure dependence on the distance to the source in summer and winter

Более интересная ситуация может сложиться в зимних условиях, когда и если приповерхностный канал захватит и сформирует в ЗТ несколько водных и водно-поверхностных лучей. На рис. 3, б видно, что зимой антенна принимает водные и вытекающие моды и на расстояниях, начиная с 7–8 км, в приповерхностном канале формируются рефрагированные лучи, и уровень сигналов увеличивается почти на 15 дБ. В результате суммарные сигналы спадают по закону, близкому к цилиндрическому. Это позволяет допустить возможность помехоустойчивого обнаружения и оценки координат не только в БЗАО, но и на больших расстояниях.

Ниже для заданных глубин приема и излучения сравниваются результаты оценок координат в летних и зимних условиях.

Для оценки дистанции и глубины удалённого источника с использованием интерференционной картины выполним следующие операции.

А.1. Вычисление матрицы опорных (теоретических) ИК на апертуре антенны при заданных координатах приемника и различных положениях удалённого источника.

А.2. С помощью полевой программы для заданных частоты звука, гидро-физических условий (ГФУ) и глубинах расположения АР рассчитываем параметры пространственных гармоник для каждого приемника вертикальной антенны, соответствующих сигналу удаленного источника при его различных положениях и различных частотах (в узлах заданной сетки (r, z)).

А.3. По рассчитанным параметрам формируем сигналы $S_{Ti}(t|r, z)$ на приемных элементах.

А.4. Вычисляем ИК на апертуре антенны — зависимости амплитуды от частоты для всех приёмных элементов и узлов заданной сетки (r, z) : $F_{Ti}(\omega|r, z) = \left| \text{fft}(S_{Ti}(t|r, z)) \right|$.

Б. По принятым сигналам $S_{Ei}(t)$ вычисляем текущую (экспериментальную) ИК на апертуре АР:
 $F_{Ei}(\omega) = \left| \text{fft}(S_{Ei}(t)) \right|$.

В. Вычисляем для выбранной частоты зависимости коэффициента корреляции экспериментальной ИК с теоретическими ИК, ранее рассчитанными с использованием известного ВРСЗ для различных вероятных координат источника:

$$K(r, z) = \sum_{i=1}^{Nh} \sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_h} F_{Ti}(\omega | r, z) \cdot F_{Ei}(\omega) / \sqrt{W_T(r, z) \cdot W_E},$$

$$W_T(r, z) = \sum_{i=1}^{Nh} \sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_h} F_{Ti}^2(\omega | r, z), \quad W_E = \sum_{i=1}^{Nh} \sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_h} F_{Ei}^2(\omega).$$

Г. В качестве искомой оценки дистанции до источника и его глубины принимаем аргументы максимума вычисленной зависимости коэффициента корреляции $K(r, z)$.

Отметим также, что в БЗАО, как видно на рис. 1, при фиксированной глубине приёмника наблюдается постоянство периода интерференционной картины по частоте — это обусловлено постоянством задержек между лучами. В свою очередь разность фаз звукового давления связана с частотой и задержкой линейной зависимостью: $\Delta\phi = \Delta t \cdot f$. Как известно, максимум интерференции наблюдается при условии $\Delta\phi_k = 2\pi k$, где k — целое число. Так как период интерференционной картины по частоте равен расстоянию по частоте между двумя соседними максимумами, то получаем $T_f = f_{k+1} - f_k = \frac{\Delta\phi_{k+1} - \Delta\phi_k}{\Delta t} = \frac{2\pi(k+1) - 2\pi k}{\Delta t} = \frac{2\pi}{\Delta t}$. Следовательно, при постоянной задержке между лучами Δt имеем $T_f = \text{const}$.

Близкая к периодичности зависимость наблюдается также и вдоль вертикальной апертюры антенны. Но период интерференционной картины по глубине приёмника при фиксированной частоте будет не постоянным, так как зависимость задержек между лучами от глубины излучателя (буква И) нелинейная. Это видно из выражения для задержки между поверхностным и водным (буквы П и В) лучами (в простейшем случае, при $c(z) = \text{const}$):

$$\Delta t = t_{\text{П}} - t_{\text{В}} = \frac{1}{c} \left(\sqrt{r^2 + (z_{\text{И}} + z_{\text{П}})^2} - \sqrt{r^2 + (z_{\text{И}} - z_{\text{П}})^2} \right).$$

Эти оценки можно использовать при моделировании или обработке экспериментальных данных для проверки точности оценки дальности и глубины с использованием интерференционной структуры.

4. Моделирование и оценка эффективности принятых алгоритмов

4.1. Оценка координат источника по углам скольжения

Рассмотрим эффективность оценки расстояния до источника и его глубины по углам прихода (скольжения) лучей. Оценки углов скольжения при заданном ВРСЗ позволяют построить траектории обратных лучей. Дальности и глубины источника определяются точками пересечения лучей.

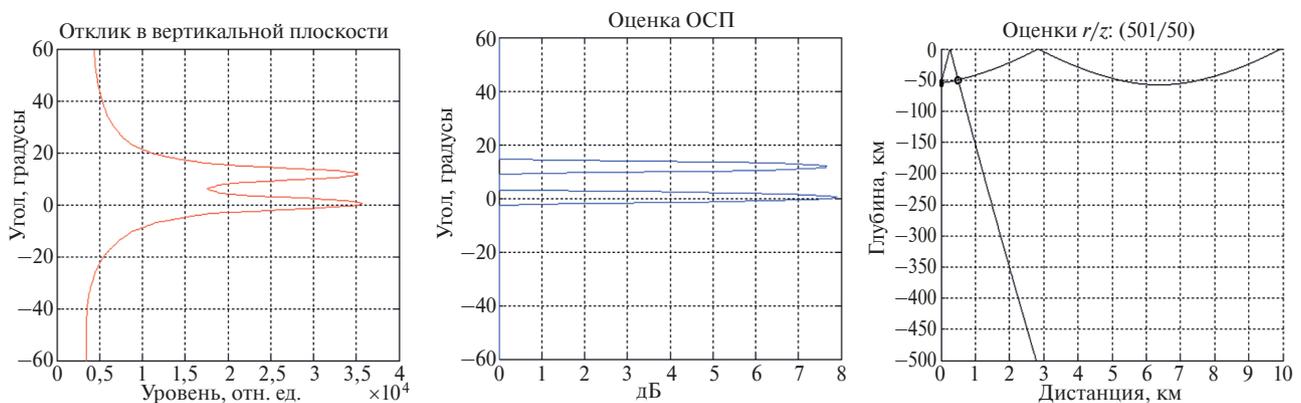


Рис. 4. Дистанция 500 м

Fig. 4. Distance 500 m

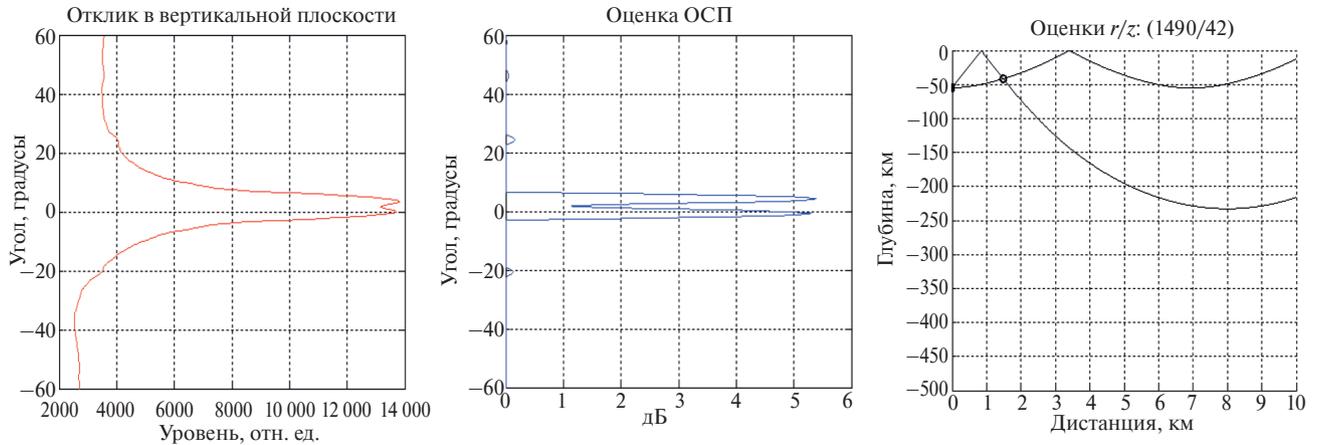


Рис. 5. Дистанция 1500 м

Fig. 5. Distance 1500 m

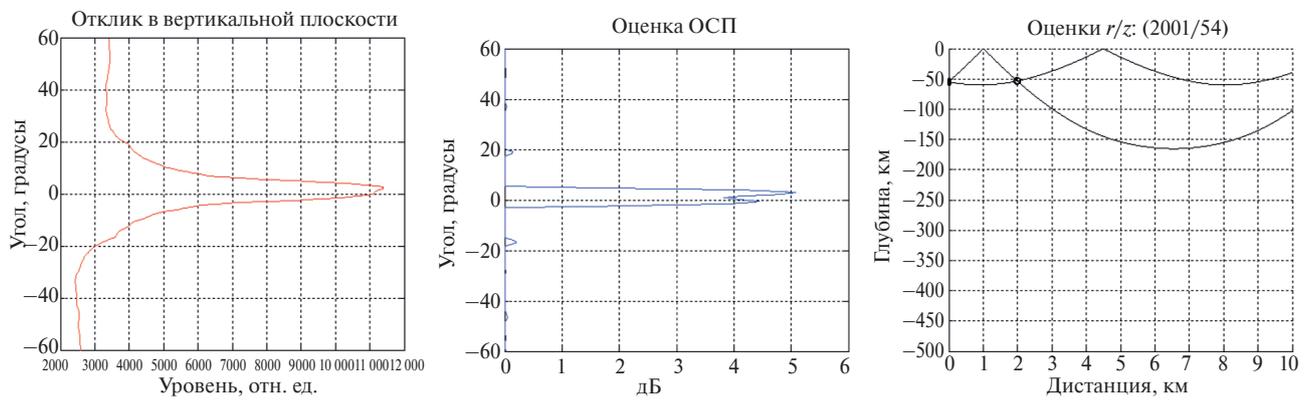


Рис. 6. Дистанция 2500 м

Fig. 6. Distance 2500 m

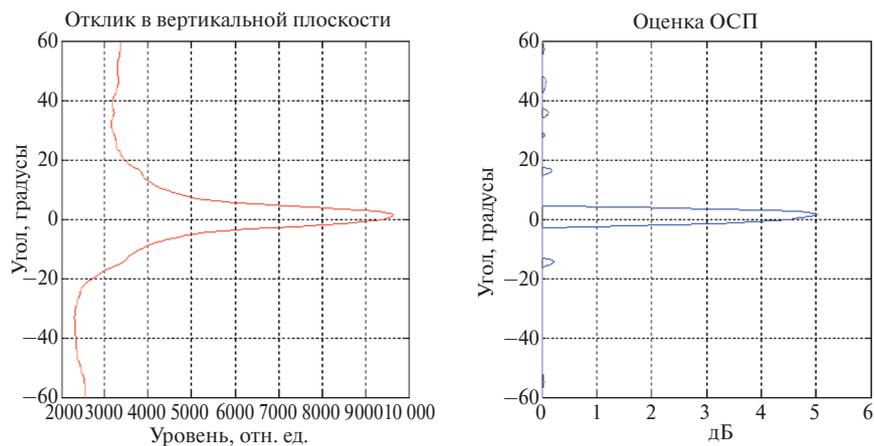


Рис. 7. Дистанция 3000 м

Fig. 7. Distance 3000 m

На рис. 4–8 слева направо приведены угловые спектры, оценки отношения сигнал/помеха (ОСП) и лучевые картины для летних условий при различных расстояниях до источника. Видно, что в глубоком море

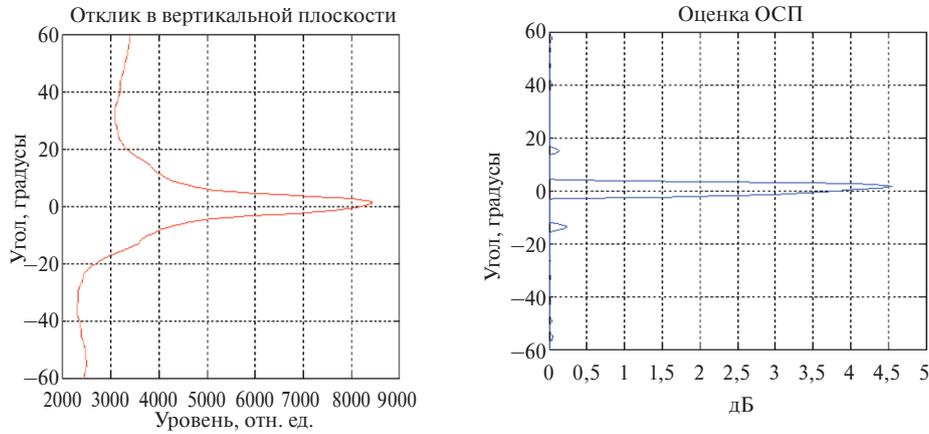


Рис. 8. Дистанция 5000 м

Fig. 8. Distance 5000 m

для заданных глубин расположения приемника и источника оценить дистанцию и глубину источника по углам скольжения лучей на расстояниях более 2,5 км не удастся, так как углы скольжения прямого и отражённого от поверхности лучей «сливаются».

4.2. Оценка расстояния до источника и его глубины по интерференционной структуре поля на апертуре антенны

Как отмечалось выше, оценку дистанции до шумящего объекта и его глубины можно выполнить, используя согласованную с акустическим полем обработку (matched-field processing). Такая обработка является обобщением корреляционной обработки сигнального поля, создаваемого удалённым источником на входе приёмной антенной решётки (АР). В качестве оценки дистанции до источника и его глубины принимаем аргументы максимума зависимости коэффициента корреляции $K(r, z)$ (рис. 9).

Моделирование выполним для вертикальных антенн с апертурой 100 м и 10 м для зимних условий при глубине источника 50 м. Рассчитанные оценки глубины указаны стрелками. Из анализа рис. 9–10 видно, что зимой по интерференционной структуре на апертуре антенны высотой 100 м можно получить точную оценку координат источника на дистанциях до 10 км, то есть в ближней зоне акустической освещённости и на начальном участке зоны тени (при условии достаточного отношения сигнал/помеха).

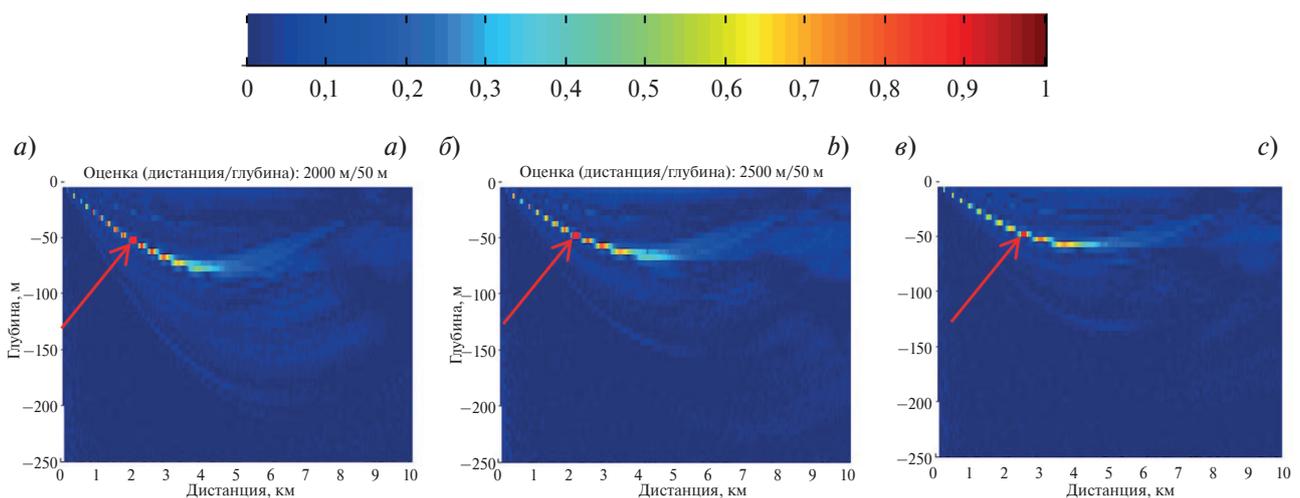


Рис. 9. Оценки координат источника на дистанциях 2000 (а), 2500 (б) и 3000 м (в). Цветовая шкала соответствует величине коэффициента корреляции

Fig. 9. Dependences of source coordinates at distances of 2000 (a), 2500 (b) and 3000 m (c). The color scale corresponds to the value of the correlation coefficient

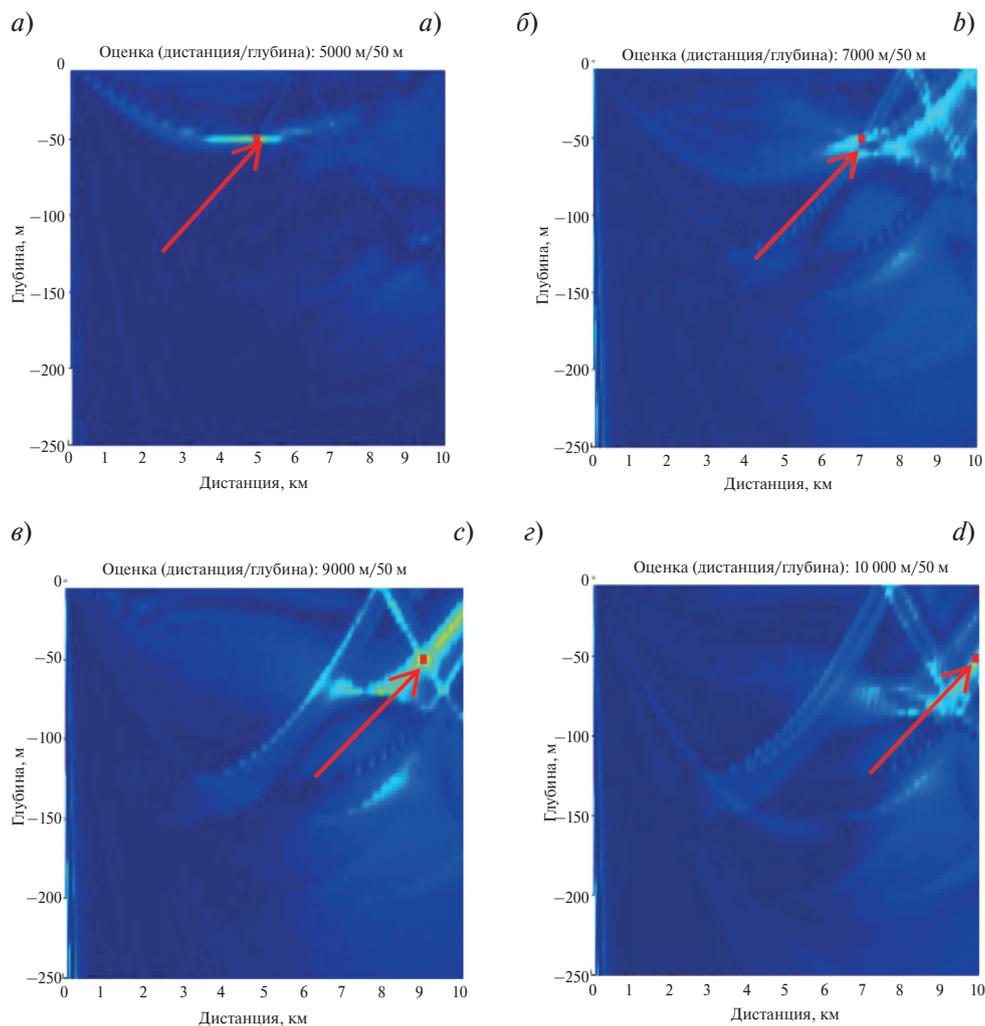


Рис. 10. Оценки координат источника на дистанциях 5000 (а), 7000 (б), 9000 (в) и 10000 м (д). Цветовая шкала соответствует величине коэффициента корреляции (см. рис. 9)

Fig. 10. Estimates of source coordinates at distances of 5000 (a), 7000 (b), 9000 (c) and 10000 m (d). The color scale corresponds to the value of the correlation coefficient (see Fig. 9)

Ниже на рис. 11–13 также для зимних ГФУ, соответствующих рис. 2, б, и расстояний 2,8–9 км приведены результаты моделирования для вертикальной антенны с апертурой 10 м.

Из полученных результатов следует, что однозначная оценка координат источника сигнала с помощью антенны высотой 10 м возможна не всегда — для этого необходимо, чтобы число энерго-несущих лучей было больше, чем два. В случаях, когда интерференционная структура формируется двумя лучами (рис. 11, 12), также получаем не однозначную оценку. В этом случае кроме интерференции в качестве дополнительной информации можно использовать оценку угла скольжения лучей, полученную по максимуму отклика антенны. С целью получения однозначной оценки дальности и глубины будем использовать одновременно два алгоритма. Рассмотрим эффективность такой комбинированной обработки.

5. Оценка координат источника комбинированным методом по углам скольжения и интерференционной структуре. Размер вертикальной антенны 10 м

Комбинированный алгоритм оценки координат шумящего объекта использует интерференционную картину, создаваемую его сигналом на апертуре приёмной антенны, и угол скольжения обнаруженного луча с максимальной амплитудой. Расчеты выполнены также для Норвежского моря при зимних ГФУ, соответствующих февралю (рис. 2, б).

В условиях глубокого моря оценить по углам скольжения лучей дистанцию и глубину источника сигнала на расстояниях более 2,5 км не получается, так как углы скольжения прямого и отражённого от поверхности лучей «сливаются», и в отклике приёмной антенны наблюдается только один пик (см. рис. 11 и 12).

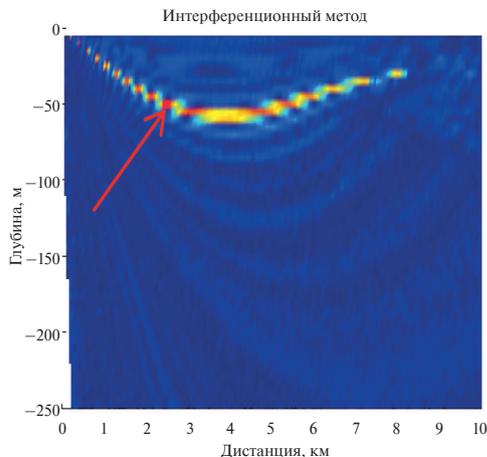


Рис. 13. Дистанция 2500 м

Fig. 13. Distance 2500 m

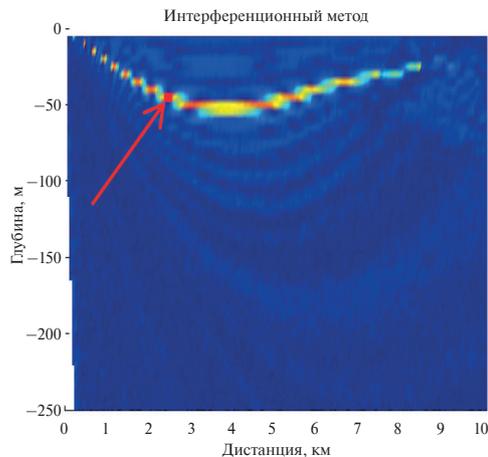


Рис. 14. Дистанция 3000 м

Fig. 14. Distance 3000 m

С помощью интерференционного метода на этих дистанциях также не удаётся получить однозначную оценку координат источника, но данный метод даёт на разных дистанциях точные оценки глубины источника — при неопределённости расстояния (рис. 13, 14). На рис. 15 зависимость глубины от дистанции изображена пунктирной линией, а сплошной линией, как и ранее, изображены траектории лучей с углами скольжения, полученными по максимуму отклика вертикальной антенны. Координаты точки пересечения указывают место расположения источника.

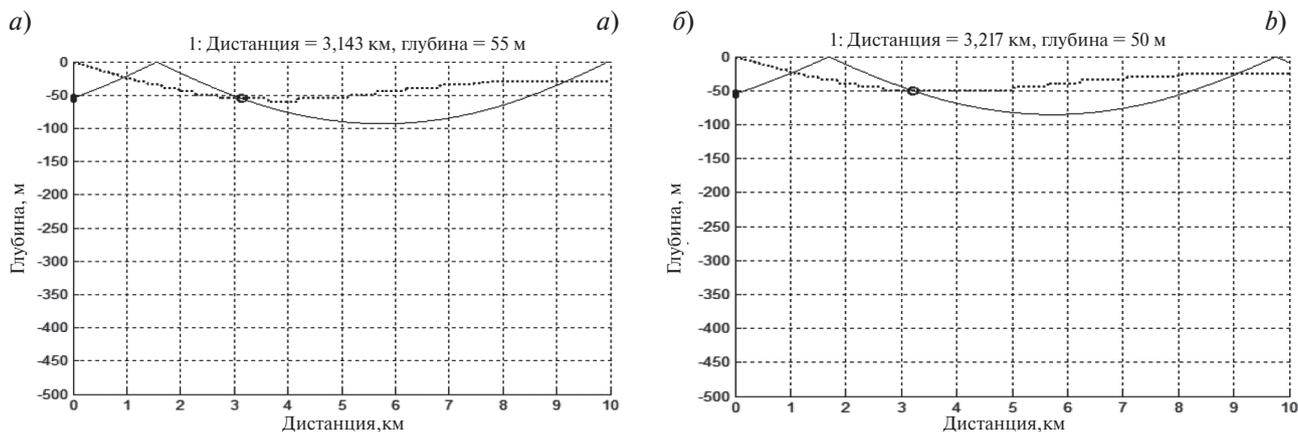


Рис. 15. Оценка координат источника комбинированным методом на дистанциях 2800 (а) и 3000 м (б)

Fig. 15. Estimation of source coordinates by a combined method at distances of 2800 (a) and 3000 m (b)

Приведенные графики подтверждают работоспособность комбинированного метода при одновременной оценке дистанции и глубины источника. Также из приведенных результатов следует, что наблюдаемые ошибки полученных оценок обусловлены, в основном, ошибками оценки угла скольжения луча, а пунктирная линия, которая получена интерференционным методом, проходит через истинные координаты источника.

Далее приведены результаты, полученные с помощью комбинированного метода для дистанций до источника сигнала 4, 5 и 6 км. Отметим, что зимой при больших дистанциях (до 9–10 км) интерференционный метод даёт однозначную оценку координат и без учета углов скольжения. Причина — расщепление и, как следствие — размножение и разрешение лучей в зоне приповерхностного термического канала при зимних условиях.

Отметим, что первое пересечение на рис. 15–16 можно не учитывать, так как на таких малых дистанциях лучи уверенно разделяются по углам скольжения.

Из полученных результатов следует, что комбинированный метод позволяет оценить дистанцию до шумящего объекта и его глубину даже в тех случаях, когда лучи не разрешаются ни по пространству, ни по времени прихода сигналов.

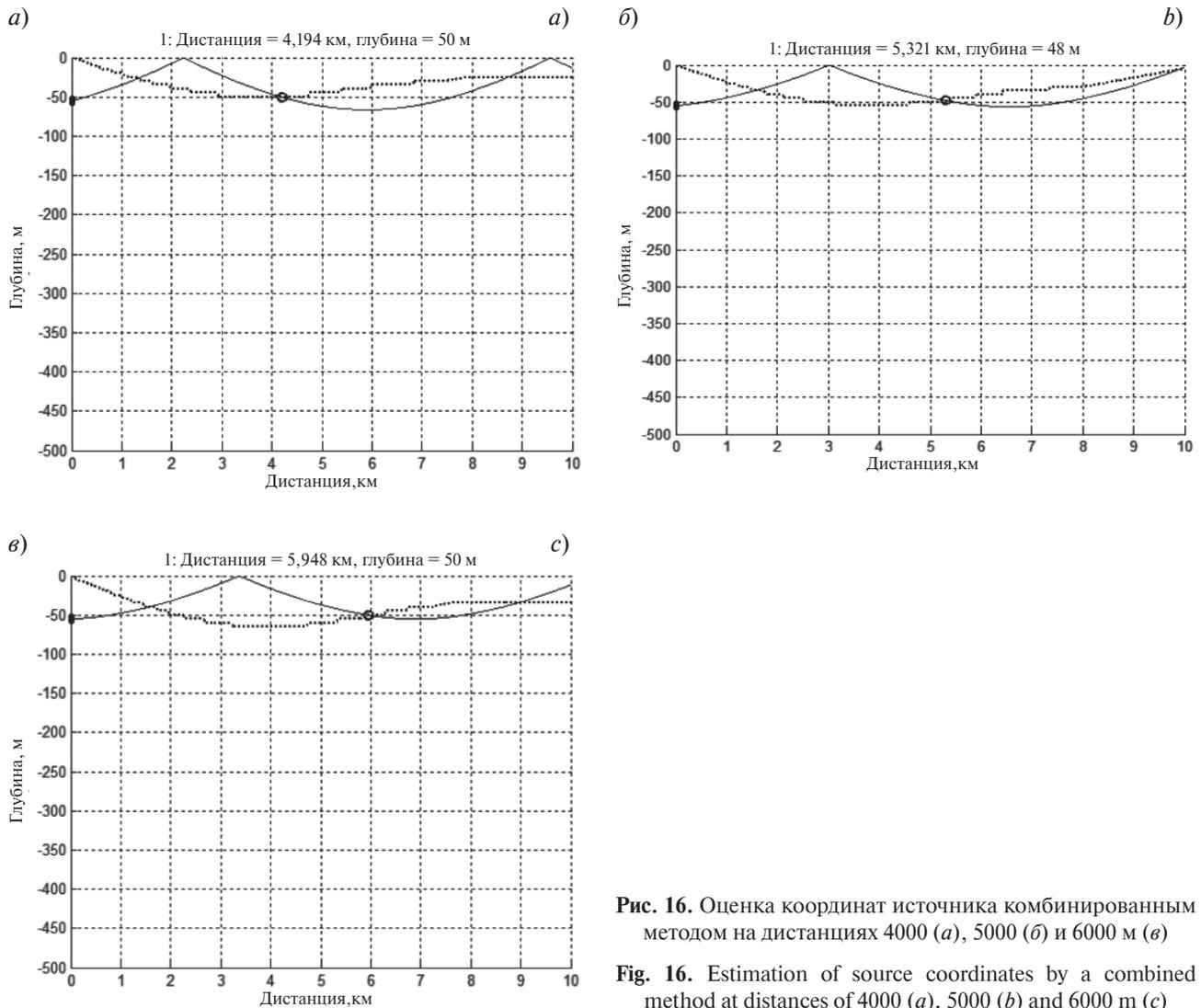


Рис. 16. Оценка координат источника комбинированным методом на дистанциях 4000 (а), 5000 (б) и 6000 м (в)

Fig. 16. Estimation of source coordinates by a combined method at distances of 4000 (a), 5000 (b) and 6000 m (c)

6. Заключение

Разработаны и исследованы алгоритмы, использующие для оценки в глубоком море дальности до источника и его глубины сравнительно короткие вертикальные антенны и параметры поля сигналов: углы прихода (скольжения) и/или интерференционную структуру на апертуре антенны. Алгоритмы могут использоваться для решения поставленной задачи при моделировании или обработке экспериментальных данных, полученных в морских условиях.

В результате выполненных исследований установлено или подтверждено:

- оценка дальности и глубины источника с использованием углов скольжения возможна в БЗАО только на малых расстояниях — до тех пор, пока лучи разрешаются;

- для оценки дальности и глубины с использованием интерференционной структуры на апертуре антенны не только в БЗАО, но и в ЗТ, необходимо использовать антенны с большой апертурой. Антенна с апертурой 100 м в зимних условиях решает эту задачу на дальностях до 10 км. Летом дальность ограничивается размерами БЗАО;

- обработка интерференционной структуры на вертикальных антеннах с небольшой апертурой (например, 10 м) не дает однозначной оценки дальности и глубины источника, если в волноводе используется двухлучевая модель сигнала. Для обеспечения однозначности оценок требуется дополнительная информация;

- совместное применение двух разработанных алгоритмов, во-первых, увеличивает размеры зоны подводного наблюдения, в пределах которой возможна оценка координат источника, и, во-вторых, эта зона обнаружения становится сплошной, что повышает эффективность траекторного накопления. Комбинированный метод позволяет оценить дистанцию до шумящего объекта и его глубину даже в тех случаях, когда лучи не разрешаются ни по пространству, ни по времени прихода сигналов;

— для разделения источников на классы «надводный» и «подводный» источники достаточно применения только одного алгоритма — с анализом интерференционной структуры, позволяющей оценить глубину источника.

Литература

1. *Baggeroer A., Kuperman W., Schmidt H.* Matched field Processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1988. Vol. 83. P. 571–587. doi:10.1121/1.396151
2. *Baggeroer A.* Why did applications of MFP fail, or did we not understand how to apply MFP? // *Proceeding of the 1st Int. Conference and Exhibition on Underwater Acoustic*. Corfu Island. Greece: Heraklion, 2013. P. 41–49.
3. *Маиошин А.И.* Практические задачи гидроакустики, решаемые с использованием алгоритмов обработки сигналов, согласованных со средой их распространения (обзор) // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 1. С. 37–48. doi:10.7868/S2073667317010051 EDN: YKUWIF
4. *Сазонтов А.Г., Малеханов А.И.* Согласованная обработка сигналов в подводных звуковых каналах (обзор) // *Акустический журнал*. 2015. Т. 61, № 2. С. 233–253 doi:10.7868/S0320791915020124 EDN: TJFQMN
5. *Коваленко В.В.* Проблемные вопросы реализации метода согласованной с полем сигнала обработки в гидроакустике // *Гидроакустика*. 2023. Т. 53, № 1, С. 39–60.
6. *Михнюк А.Н.* Определение координат источника звука с помощью согласованных с морским волноводом алгоритмов обработки сигналов // *Акустический журнал*. 2009. Т. 55, № 3. С. 401–406. EDN: KAVQRZ
7. *Drachenko V.N., Karishnev N.S., Kuznetsov G.N., Mikhnyuk A.N.* Estimation of the source distance and depth in a multipath waveguide using a vector-scalar antenna // *Physics of Wave Phenomena*. 2014. Vol. 22, No. 4. P. 1–12. doi:10.3103/S1541308X14040141 EDN: UFIUBP
8. *Белов А.И., Кузнецов Г.Н.* Методы и результаты акустической калибровки локальных зон мелкого моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2015. Т. 8, № 1. С. 68–78. EDN: TPRCL
9. *Коваленко В.В., Селезнев И.А.* Оперативная океанография в интересах акустического подводного наблюдения // *Гидроакустика*. 2023. Вып. 53, № 1. С. 89–107. EDN: EULJHE
10. *Коваленко В.В., Родионов А.А., Ванкевич Р.Е.* Методические основы построения систем оперативной океанографии в приложении к задачам подводного наблюдения // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 3. С. 4–19. doi:10.7868/S2073667321030011 EDN: SYRAXI
11. *Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н.* Векторно-скалярные поля мультипольных гидроакустических источников, эквивалентных шумоизлучению морских объектов. М.: Изд-во «Буки-Веди», 2022. 304 с. EDN: QCRPKD
12. *Какалов В.А.* Исследование возможности определения координат цели по оценкам параметров пространственно-временной структуры многолучевого сигнала гидроакустической шумопеленгаторной системой. Дисс. на соиск. уч. ст. к. т.н., ЦНИИ «Морфизприбор», 1973 г.
13. *Бородин В.В.* Потенциальная точность определения положения источника в волноводе // *Вопросы судостроения*. Серия Акустика. 1983. № 16. С. 44–52.
14. *Кузнецов Г.Н.* Пояснительная записка по ОКР «Сангар». Сухуми: Гидрофизический институт МСП, 1979. 171 с.
15. *Роберт Дж. Урик.* Основы гидроакустики / пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 444 с.
16. *Кузнецов Г.Н., Щекин И.Е.* Авторское свидетельство № 183384 СССР. Приоритет ИЗО от 01.12.1983 г.
17. *Кузнецов Г.Н., Кенигсбергер Г.В., Колюшко В.Г.* Авторское свидетельство № 286264 СССР. Приоритет ИЗО от 16.06.1987 г.
18. *Волкова А.А., Консон А.Д.* Пространственная избирательность вертикально протяженной линейной антенны в подводном звуковом канале // *Гидроакустика*. 2023. Вып. 54, № 2. С. 80–89. EDN: UGJNOS
19. *Консон А.Д., Волкова А.А.* Локализация горизонта нахождения широкополосного источника вертикально протяженной линейной антенной // *Гидроакустика*. 2023. Вып. 56, № 4. С. 19–28. EDN: QJBZLC
20. *Yang Q., Yang K.* Sound source depth estimation based on multipath time delay in deep water // *Acta Acustica*. 2018. Vol. 104, No. 2. P. 363–368. doi:10.3813/AAA.919178
21. *Ran C., Kunde Y., Yuanliang M., et al.* Passive broadband source localization based on a Riemannian distance with a short vertical array in the deep ocean // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2019. Vol. 145. EL567–EL573. doi:10.1121/1.5111971
22. *Belov A.I., Kuznetsov G.N.* Characteristics of normal waves excited by vertical arrays in shallow sea // *Physics of Wave Phenomena*. 2006. Vol. 14, No. 3. P. 66–74.
23. *Kuznetsov G.N., Alekseev V.I., Glebova G.M.* Positioning of horizontal-vertically developed multielement arrays and vector-scalar modules // *Physics of Wave Phenomena*. 2001. Vol. 9, No. 4. P. 235–241.

24. Гительсон В.С., Глебова Г.М., Кузнецов Г.Н. Определение параметров коррелированных сигналов с использованием метода Прони // Акустический журнал // 1988. Т. 34, вып. 4. С. 170–172.
25. Информационная гидроакустика. Методы информационного обеспечения гидроакустическими средствами // Под общей редакцией д. т. н. А.Д. Консона. СПб.: изд. СПбГТУ «ЛЭТИ», 2023. 367 с.
26. Аксенов С.П. Верификация вычислительной программы в модовом ВКБ-приближении для мелкого и глубокого морей // Доклады XVII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана». М.: ИО РАН, 2020. С. 364–370. doi:10.29006/978-5-9901449-5-8-59 EDN: AQQITF
27. Aksenov S.P., Kuznetsov G.N. Determination of interference invariants in a deep-water waveguide by amplitude and phase methods // Physics of Wave Phenomena. 2021. Vol. 29, No. 1. P. 81–87. doi:10.3103/S1541308X21010015 EDN: GCIXTD

References

1. Baggeroer A, Kuperman W, Schmidt H. Matched field Processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1988;83:571–587. doi:10.1121/1.396151
2. Baggeroer A. Why did applications of MFP fail, or did we not understand how to apply MFP? *Proceeding of the 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustic*. Corfu Island. Greece: Heraklion; 2013. p. 41–49.
3. Mashoshin AI. Underwater acoustics problems solving with using matched field processing. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2017;10(1):37–48. doi:10.7868/S2073667317010051 (In Russ.).
4. Sazontov AG, Malekhanov AI. Matched field signal processing in underwater sound channels (review). *Acoustical Physics*. 2015;61(2):213–230. doi:10.1134/s1063771015020128
5. Kovalenko VV. Problematic issues of implementation of the method of matched with the field of the expected signal processing in hydroacoustics. *Hydroacoustics*. 2023;53(1):39–60 (In Russ.).
6. Mikhnyuk AN. Determination of the source coordinates using signal processing algorithms matched to the oceanic waveguide. *Acoustical Physics*. 2009;55(3):411–416. doi:10.1134/S106377100903018X
7. Drachenko VN, Karishnev NS, Kuznetsov GN, Mikhnyuk AN. Estimation of the source distance and depth in a multipath waveguide using a vector-scalar antenna. *Physics of Wave Phenomena*. 2014;22(4):1–12. <https://doi.org/10.3103/S1541308X14040141>
8. Belov AI, Kuznetsov GN. Methods and results of acoustic calibration of shallow sea local zones. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2015;8(1):68–78 (In Russ.).
9. Kovalenko VV, Seleznev IA. operational oceanography for the benefit of acoustic underwater surveillance. *Hydroacoustics*. 2023;53(1):89–107 (In Russ.).
10. Kovalenko VV, Rodionov AA, Vankevich RE. Methodical base of operational oceanography systems creation in underwater surveillance tasks application. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2021;14(3):4–19. doi:10.7868/S2073667321030011 (In Russ.).
11. Kuznetsov GN, Stepanov AN. *Vector-scalar fields of multipole hydroacoustic sources equivalent to noise emissions of marine objects*. М.: Publishing house «Buki-Vedi»; 2022. 304 p. (In Russ.).
12. Kakalov VA. Study of the possibility of determining target coordinates based on estimates of the parameters of the spatio-temporal structure of a multi-beam signal of a hydroacoustic noise direction-finding system [dissertation]. Central Research Institute «Morphizpribor»; 1973. (In Russ.).
13. Borodin VV. Potential accuracy of determining the position of a source in a waveguide. *Voprosy sudostroeniya. Seria Akustika*. 1983;16:44–52. (In Russ.).
14. Kuznetsov GN. *Explanatory note on the R&D project “Sangar”*. Sukhumi: Hydrophysical Institute of SMEs; 1979. 171 p. (In Russ.).
15. Urick RJ. *Principles of Underwater Sound*. McGraw–Hill: Book Company; 1975. 445 p.
16. Kuznetsov GN, Shchekin IE. Avtorskoe svidetel'stvo № 183384 SSSR. Prioritet IZO ot 01.12.1983 g.
17. Kuznetsov GN, Kenigsberger GV, Kolinko VG. Avtorskoe svidetel'stvo № 286264 SSSR. Prioritet IZO ot 16.06.1987 g.
18. Volkova AA, Konson AD. Spatial selectivity of vertically extended linear antenna in underwater sound channel. *Hydroacoustics*. 2023;54(2):80–89. (In Russ.).
19. Konson AD, Volkova AA. Localization of the horizon of a broadband source by a vertically extended linear antenna. *Hydroacoustics*. 2023;56(4):19–28. (In Russ.).
20. Yang Q, Yang K. Sound source depth estimation based on multipath time delay in deep water. *Acta Acustica*. 2018;104(2):363–368. doi:10.3813/AAA.919178

21. Ran C, Kunde Y, Yuanliang M, et al. Passive broadband source localization based on a Riemannian distance with a short vertical array in the deep ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2019;145: EL567–EL573. doi:10.1121/1.5111971
22. Belov AI, Kuznetsov GN. Characteristics of normal waves excited by vertical arrays in shallow sea. *Physics of Wave Phenomena*. 2006;14(3):66–74.
23. Kuznetsov GN, Alekseev VI, Glebova GM. Positioning of horizontal-vertically developed multielement arrays and vector-scalar modules. *Physics of Wave Phenomena*. 2001;9(4):235–241.
24. Gitelson VS, Glebova GM, Kuznetsov GN. Determination of parameters of correlated signals using the Prony method. *Acoustical Physics*. 1988;34(4):170–172. (In Russ.).
25. Konson AD, editor. Information hydroacoustics. Methods of information support by hydroacoustic means. St. Petersburg, Publishing House of St. Petersburg State Technical University “LETI”; 2023. 367 p. (In Russ.).
26. Aksenov SP. Verification of a computational program in the mode WKB approximation for shallow and deep seas. *Reports of the XVII school-seminar named after academician L.M. Brekhovskikh “Acousticocean”*. Moscow: IORAS; 2020. p. 364–370. doi:10.29006/978-5-9901449-5-8-59. (In Russ.).
27. Aksenov SP, Kuznetsov GN. Determination of interference invariants in a deep-water waveguide by amplitude and phase methods. *Physics of Wave Phenomena*. 2021;29(1):81–87. doi:10.3103/S1541308X21010015

Об авторах

ДРАЧЕНКО Владимир Николаевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Прикладной акустики» Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Scopus AuthorID: 56426340700, WoS ResearcherID: I-2248-2018, e-mail: NCVI@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Геннадий Николаевич, кандидат физико-математических наук, профессор, заведующий отделом «Морские технологии» ИОФ РАН, ORCID: 0009-0002-8508-4516, Scopus AuthorID: 7102353416, WoS ResearcherID: L-3915-2018, SPIN-код (РИНЦ): 3269-1745, e-mail: skbmortex@mail.ru

МИХНЮК Александр Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, старший преподаватель РУДН, ORCID: 0000-0002-4034-2940, Scopus AuthorID: 6505646350, WoS ResearcherID: I-2237-2018, SPIN-код (РИНЦ): 8737-0750, e-mail: amihnyuk@mail.ru